

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlegendes	1
1.1. Was ist ein System?	1
1.2. Was ist ein Experiment?	3
1.3. Modellbildung: Warum?	4
1.4. Wege der Modellbildung	5
1.4.1. Physikalische Modellbildung: White-Box Modell	5
1.4.2. Systemidentifikation: Black-Box Modell	6
1.4.3. Semi-empirische Modelle	6
1.4.4. Überblick	6
1.5. Modelleigenschaften	8
1.5.1. Statische und dynamische Modelle	8
1.5.2. Kontinuierliche und diskrete Modelle	9
1.5.3. Modelle mit Unstetigkeiten	9
1.5.4. Modelle mit konzentrierten und verteilten Parametern	11
1.5.5. Linearisierung nichtlinearer Modelle	12
1.5.6. Zeitvariante und zeitinvariante Modelle	18
1.5.7. Deterministische und stochastische Modelle	19
1.5.8. Stabile, instabile und grenzstabile Modelle	19
1.5.9. Steife Modelle	19
1.5.10. Modelleigenschaften die im Buch behandelt werden	20
1.6. Abstraktion: Detaillierungsgrad von Modellen	21
1.7. Modellparametrierung	22
1.7.1. Parameterextraktion aus dem Herstellerdatenblatt	24
1.7.2. Berechnen von Parametern	24
1.7.3. Messtechnische Ermittlung von Parametern	25
1.7.4. Parameterschätzung	25
1.7.5. Parametervariation	27
1.7.6. Finite Elemente Methode zur Parametergewinnung	27
1.8. Simulation dynamischer Systeme	28
1.9. Übersicht aktueller Simulationsmethoden	31
2. Einführung in die Zustandsraumdarstellung	35
2.1. Zustandsvariablen	36
2.2. Ein einführendes Beispiel	37

2.3. Zustandsraumdarstellung	41
2.3.1. Eingrößensysteme (SISO-Systeme)	42
2.3.2. Mehrgrößensysteme (MIMO-Systeme)	43
2.3.3. Interpretation der Zustandsgleichung	45
2.3.4. Interpretation der Ausgangsgleichung	47
2.3.5. Grafische Interpretation der Zustandsraumdarstellung	47
2.4. Schnittstelle zur Simulation	48
2.5. Analytische Lösung der Zustandsgleichung	49
2.5.1. Autonome skalare Systeme (Homogene Lösung)	49
2.5.2. Inhomogene skalare Lösung	53
2.5.3. Inhomogene Lösung	54
3. Modellbildung: Ein iterativer Prozess	57
3.1. Vorgehensweise bei der Modellerstellung	57
3.1.1. Abstraktion des realen Systems	58
3.1.2. Gleichungssystem erstellen	59
3.1.3. Gleichungssystem sortieren	61
3.1.4. Implementierung des Gleichungssystems	63
3.1.5. Numerische Integration: Simulation	69
3.1.6. Verifikation	72
3.1.7. Modifikation	73
3.2. Methoden zur Modellbildung mechatronischer Systeme	73
3.2.1. Signalflussorientierte (kausale) Modellbildung: Blockschaltbilder	74
3.2.2. Bondgraphen	75
3.2.3. Objektorientierte Modellbildung	75
4. Signalflussorientierte Modellbildung: Blockschaltbilder	77
4.1. Die Entwicklung der kausalen Modellierung	78
4.1.1. Analoge Simulation	78
4.1.2. Digitale Simulation	84
4.2. Modellbasierter Systementwurf eines Feder-Masse-Dämpfer Systems	87
4.2.1. Initialer Modellentwurf	88
4.2.2. Erste Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	95
4.2.3. Erste Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	99
4.2.4. Zweite Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	103
4.2.5. Zweite Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	105
4.2.6. Dritte Modifikation des bestehenden Blockschaltbilds	110
4.2.7. Dritte Modifikation durch Erstellen eines neuen Blockschaltbilds	111
4.2.8. Diskussion	112

4.2.9.	Ausblick	113
5.	Die Theorie der Bondgraphen	115
5.1.	Grundlegende Zusammenhänge physikalischer Systeme	116
5.1.1.	Elektrische Systeme	117
5.1.2.	Mechanisch-translatorische Systeme	119
5.1.3.	Mechanisch-rotatorische Systeme	120
5.1.4.	Fluss-Systeme (Hydraulische Systeme)	121
5.1.5.	Thermodynamische Systeme	125
5.1.6.	Entwickeln allgemeingültiger Gleichungen	126
5.2.	Akausale Bondgraphen	131
5.2.1.	Verlustbehaftete Elemente (R-Element)	133
5.2.2.	Energiespeichernde Elemente	134
5.2.3.	Aktive Elemente (Quellen)	137
5.2.4.	Verzweigungen	137
5.2.5.	Vereinfachungen	140
5.2.6.	Beispiele	140
5.3.	Komponentenbasierter Modellierungsansatz	148
5.3.1.	Elektrische Systeme	149
5.3.2.	Intensive und extensive Variablen	156
5.3.3.	Mechanische Systeme	157
5.4.	Kausale Bondgraphen – Kausale Analyse	162
5.4.1.	Kausalisierung der Quellen	165
5.4.2.	Kausalisierung der passiven Elemente	166
5.4.3.	Kausalisierung der Verzweigungen	168
5.4.4.	Anleitung zur Kausalisierung von Bondgraphen	171
5.4.5.	Beispiel: Kausalisierung des Bondgraphen einer elektri- schen Schaltung	172
5.4.6.	Aufstellen der Gleichungen anhand des Bondgraphen	173
5.4.7.	Blockschaltbild	176
5.5.	Weitere Bondgraph-Elemente: Energieumwandlung	176
5.5.1.	Widerstandsquellen	177
5.5.2.	Transformatoren	178
5.5.3.	Gyratoren	180
5.5.4.	Beispiel: Permanenterregter Gleichstrommotor	181
5.5.5.	Beispiel: Mechanisches System	185
5.5.6.	Beispiele zu hydraulisch-mechanischen Systemen	189
5.6.	Kausale Pfade	197
5.6.1.	Beispiel: Permanenterregter Gleichstrommotor	197
5.7.	Das Dualitätsprinzip – Duale Bondgraphen	201
5.7.1.	Beispiel: Feder-Masse-Dämpfer Schwinger	201
5.7.2.	Vorgehensweise beim Dualisieren von Bondgraphen	204

5.8. Kausalitätskonflikte in Bondgraphen	205
5.8.1. Einblicke in das Modell mittels kausaler Analyse	205
5.8.2. Algebraische Schleifen in Bondgraphen	207
5.8.3. Strukturelle Singularitäten	214
5.9. Die vier Grundvariablen der Bondgraphen-Modellierung	228
5.10. Sensoren und modulierte Elemente	229
5.10.1. Sensoren	231
5.10.2. Modulierte Elemente zur Energieumwandlung	233
5.10.3. Modulierte Quellen	234
5.10.4. Beispiel: Elektrische Schaltung mit modellierter Stromquelle	234
5.10.5. Beispiel: Feder-Masse Schwinger	235
5.10.6. Beispiel: Mechanischer Schockabsorber	241
5.11. Modellbasierter Systementwurf	244
5.11.1. Initialer Systementwurf	245
5.11.2. Erste Modifikation	247
5.11.3. Zweite Modifikation	250
5.11.4. Dritte Modifikation	251
5.12. Nichtlineare Bondgraphen am Beispiel der Gleichstrom-Neben- schlussmaschine	256
5.12.1. Erstellung des Bondgraphen	257
5.12.2. Aufstellen der Zustandsgleichungen	258
5.12.3. Linearisierung	260
5.13. Irreversible Thermodynamik	263
5.13.1. Motivation: Thermische Ersatzschaltbilder	263
5.13.2. Pseudo-Bondgraphen zur Beschreibung thermodynamischer Phänomene	266
5.13.3. Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Widerstands	271
5.13.4. Echte Bondgraphen zur Beschreibung thermodynamischer Phänomene	273
5.13.5. Beispiel: Thermisches Modell einer permanenterregten Gleichstrommaschine	280
5.14. Zweidimensionale mechanische Systeme	281
5.14.1. Das mathematische Pendel	284
5.14.2. Das physikalische Pendel	286
5.14.3. Bondgraph des Pendels	287
5.14.4. Beispiel: Verladebrücke	291
5.14.5. Beispiel: Doppelpendel	300
5.14.6. Resümee	302
6. Einführung in die objektorientierte Modellierung	305
6.1. Verfügbare Sprachen	305
6.1.1. Modelica	306
6.1.2. Simscape	308

6.1.3.	VHDL-AMS	308
6.1.4.	Simscape, VHDL-AMS und Modelica	311
6.1.5.	Modelica und Dymola	312
6.2.	Akausale Modellierung	313
6.2.1.	Einführung	313
6.2.2.	Initialer Entwurf des Feder-Masse-Dämpfer Systems in Modelica	315
6.2.3.	Erste Modifikation des Systems	318
6.2.4.	Zweite Modifikation des Systems	319
6.2.5.	Dritte Modifikation des Systems	320
6.2.6.	Diskussion	321
6.3.	Komponentenbasierte Modellierung	322
6.3.1.	Voraussetzungen	323
6.3.2.	Erstellung von komponentenbasierten Modellen	331
6.3.3.	Gruppieren von komponentenbasierten Modellen in Packa- ges	338
6.3.4.	Initialer Entwurf des Feder-Masse-Dämpfer Systems mit- tels Komponenten	340
6.3.5.	Erste Modifikation des Systems	342
6.3.6.	Zweite Modifikation des Systems	343
6.3.7.	Dritte Modifikation des Systems	343
6.3.8.	Diskussion	344
6.4.	Objektorientierung in der Modellbildung	345
6.4.1.	Klassen, Objekte und Schnittstellen	346
6.4.2.	Annotations	350
6.4.3.	Attribute von Variablen	354
6.4.4.	Abstraktion - Abstraction	359
6.4.5.	Komposition - Composition	361
6.4.6.	Hierarchische Modellierung	362
6.4.7.	Vererbung - Inheritance	367
6.4.8.	Gleiche Klassen - Short Class Definition	372
6.4.9.	Austauschbarkeit - Replaceable/Redeclare	372
6.4.10.	Bedienbarkeit über Austauschbarkeit	377
6.4.11.	Entwurf und Modifikation des Feder-Masse-Dämpfer Sys- tems über Objekte	393
6.4.12.	Objektorientierte Modellierung und Bondgraphen	393
6.4.13.	Von objektorientierten Modellen zu einem Simulationser- gebnis	398
6.5.	Die symbolische Vorverarbeitung	404
6.5.1.	Symbolische Vorverarbeitung: „Index 0“ Systeme	405
6.5.2.	Algebraische Schleifen: „Index 1“ Systeme	413
6.5.3.	Strukturelle Singularitäten: „höhere Index“ Systeme	421

6.5.4.	Eine Alternative: Direkte Lösung von impliziten Gleichungssystemen	425
6.5.5.	Resümee	426
7.	Modelica	429
7.1.	Modelica Funktionalität	429
7.1.1.	Vektoren, Matrizen und Schleifen	430
7.1.2.	Warnungen und Fehler	439
7.1.3.	Beschreibung von Diskontinuitäten	440
7.1.4.	Initialisierung	452
7.1.5.	Prozeduraler Code	457
7.1.6.	Dokumentation von Klassen	465
7.1.7.	Dymola Funktionalitäten	466
7.2.	Fehlersuche und Performance	471
7.2.1.	Häufige Fehler	471
7.2.2.	Fehlersuche in Modellen	485
7.2.3.	Modelleigenschaften	487
7.2.4.	Profiling	490
7.2.5.	Performancesteigerung	496
7.3.	Die Modelica Standard Library	501
7.3.1.	Kausale Blocks	502
7.3.2.	Zustandsgraphen	504
7.3.3.	Interfaces mit einzelnen Variablenpaaren	507
7.3.4.	Interfaces mit mehreren Variablenpaaren	514
7.3.5.	Fortgeschrittene Schnittstellen	516
7.3.6.	Komponenten die Domänen überbrücken	525
7.3.7.	Erweitern der MSL	527
7.3.8.	Andere Libraries	527
7.4.	Das Functional Mockup Interface	527
7.4.1.	Wichtige Grundbegriffe	528
7.4.2.	Modelica Adapter und Beispiele zur Erstellung von FMUs	529
7.4.3.	Erstellung von FMUs aus Dymola	532
7.4.4.	Generelle Hinweise zur Erstellung von FMUs	534
8.	Simulation und numerische Integrationsverfahren	537
8.1.	Einleitung und Allgemeines	537
8.2.	Grundlegende Integrationsverfahren	546
8.2.1.	Vorwärts-Euler oder explizites Euler-Verfahren	546
8.2.2.	Erste Stabilitätsbetrachtungen	552
8.2.3.	Rückwärts-Euler oder implizites Euler-Verfahren	555
8.3.	Runge-Kutta-Verfahren	571
8.3.1.	Heun Algorithmus oder Runge-Kutta 2. Ordnung	574
8.3.2.	Allgemeine Herleitung von Runge-Kutta-Verfahren	574

8.3.3.	Explizite Mittelpunktregel	576
8.3.4.	Runge-Kutta 4. Ordnung - RK4	576
8.3.5.	Runge-Kutta-Verfahren höherer Ordnung	580
8.4.	Implizite Runge-Kutta-Verfahren	581
8.4.1.	Das Butcher Tableau	581
8.4.2.	Radau Algorithmen	583
8.4.3.	Lobatto Algorithmen	584
8.4.4.	Sonderfälle von impliziten Runge-Kutta-Verfahren . . .	584
8.5.	Stabilität numerischer Lösungsverfahren	585
8.5.1.	Der Weg zur Stabilitätsdomäne	585
8.5.2.	Algorithmus zur Bestimmung der Stabilitätsdomäne . .	590
8.5.3.	Genauigkeit	593
8.5.4.	Steife Systeme	596
8.5.5.	Ungedämpfte Systeme	598
8.6.	Mehrschrittverfahren	599
8.6.1.	Newton-Gregory Polynome	600
8.6.2.	Adams-Bashforth (AB)	609
8.6.3.	Backward-Difference Formulae (BDF)	613
8.7.	Die Annäherung an die Realität	616
8.7.1.	Fehlerquellen	617
8.7.2.	Numerikbasierte Fehler	618
8.7.3.	Allgemeine Fehlerbegriffe	619
8.7.4.	Resümee	621
8.8.	Erweiterungen numerischer Integrationsverfahren	622
8.8.1.	Schrittweitensteuerung	622
8.8.2.	Anpassung der Ordnung	627
8.8.3.	Das Startup Problem	629
8.8.4.	Dense Output	629
8.8.5.	Unstetigkeiten	630
8.8.6.	Zusammenfassung zu Integrationsverfahren und deren Erweiterungen	638
8.9.	Faustregeln bei der Wahl von Solver und Schrittweite	640
8.10.	Interpretation von Solverausgaben	642
8.11.	Echtzeitsimulation	647
8.11.1.	Solvertypen	648
8.11.2.	Events	649
8.11.3.	Fortgeschrittene Techniken	650
8.12.	Alternative Lösungsverfahren	652
8.12.1.	Inline Integration	652
8.12.2.	Quantized State Simulation	653

Anhang	655
A. Systeme linearer Differentialgleichungen 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten	655
B. Generierter Code des Feder-Masse-Dämpfer Modells	659
C. Lineare Analyse des Feder-Masse-Dämpfer Modells	663
Literaturverzeichnis	667
Sachwortverzeichnis	673